

• 试验研究 Experimental Research •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5184

Zr 元素对 DD416 单晶高温合金叶片 疏松缺陷的影响

胡生垚¹, 杨文超¹, 张彦超¹, 张 剑², 郭 敏¹, 杨 敏¹, 苏海军¹, 刘 林¹

(1. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室 陕西 西安 710072 2. 中国航发北京航空材料研究院 北京 100095)

摘 要: 以第一代镍基单晶高温合金 DD416 及其叶片为研究对象, 采用 ProCAST 铸造模拟软件对 Zr 含量为 0.001%、0.003%、0.007%、0.012% (质量分数, 下同) 的单晶叶片的疏松缺陷进行模拟。结果表明, 疏松缺陷主要分布于叶片缘板处, 并随 Zr 的增加其含量先降低后升高。实验表明, 当 Zr 含量为 0.007% 时, DD416 单晶叶片疏松缺陷最低, 实验结果与模拟结果趋势基本相同。分析其原因, 当 Zr 含量从 0.001% 增加至 0.007% 时, 叶片一次枝晶间距的变化是疏松缺陷的主要影响因素。Zr 含量的增加使叶片凝固过程中溶质的扩散激活能增大, 扩散系数减小, 使叶片一次枝晶间距减小, 最终导致疏松缺陷含量降低, 实验结果中疏松含量从 10Zr 的 0.463% 降低到 70Zr 的 0.064%。当 Zr 含量从 0.007% 增加至 0.012% 时, 此时疏松缺陷的主要影响因素为 γ/γ' 共晶组织含量和凝固区间, 共晶组织含量进一步增加, 合金的固相线降低, 凝固区间增大, 导致疏松缺陷增加, 实验结果中疏松含量增加到 0.493%。

关键词: DD416 高温合金; 微量元素 Zr; 单晶叶片; 疏松缺陷

中图分类号: TG21

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)04-0434-08

Effects of Zr on the Microporosity Defects of DD416 Single Crystal Superalloy Blades

HU Shengyao¹, YANG Wenchao¹, ZHANG Yanchao¹, ZHANG Jian², GUO Min¹,
YANG Min¹, SU Haijun¹, LIU Lin¹

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: To simulate the microporosity defects of single-crystal blades with Zr contents of 0.001 wt.%, 0.003 wt.%, 0.007 wt.% and 0.012 wt.%, the first-generation nickel-based single crystal superalloy DD416 and its blades were used as the research objects. The simulation results reveal that the microporosity defects are distributed mainly at the blade edge plate and that their content decreases first but then increases with increasing Zr. The experimental results and simulation results show essentially the same trend, and the experiments reveal that when the Zr content is 0.007 wt.%, the porosity defects of the DD416 single-crystal blade are the lowest. An examination of the reasons for this phenomenon reveals that when the Zr content increases from 0.001 wt.% to 0.007 wt.%, the change in primary dendrite spacing is the main factor influencing the formation of microporosity defects. An increase in the Zr content leads to an increase in the diffusion activation energy of solutes during the solidification process of the blades and a decrease in the diffusion coefficient, thereby decreasing the primary dendrite spacing and ultimately lowering the content of microporosity defects. The porosity defect content in the experimental results decreases from 0.463% in 10Zr to 0.064% in 70Zr. However, when the Zr content increases from 0.007 wt.% to 0.012 wt.%, the main influencing factors for microporosity defects are the volume fraction of the γ/γ' eutectic phase and the solidification range. The content of the eutectic structure further increases, the solidus temperature of the alloy decreases, and the solidification range expands, resulting in an increase in microporosity. The porosity content in the experimental results increased to 0.493%.

Key words: DD416 superalloy; minor alloying element Zr; single crystal blades; microporosity defect

收稿日期: 2025-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(52322410); 中国航发北京航空材料研究院校企合作项目(2021-01-2805-WX)

作者简介: 胡生垚, 2002 年生, 硕士生. 研究方向为等轴晶铸造高温合金凝固其成形. Email: hsy123@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 杨文超, 1985 年生, 博士, 教授. 研究方向为高温合金、铝合金及其零件成形基础和应用. Email: wenchao yang@nwpu.edu.cn

引用格式: 胡生垚, 杨文超, 张彦超, 张剑, 郭敏, 杨敏, 苏海军, 刘林. Zr 元素对 DD416 单晶高温合金叶片疏松缺陷的影响[J]. 铸造技术, 2026, 47(4): 434-441.

HU S Y, YANG W C, ZHANG Y C, ZHANG J, GUO M, YANG M, SU H J, LIU L. Effects of Zr on the microporosity defects of DD416 single crystal superalloy blades[J]. Foundry Technology, 2026, 47(4): 434-441.

镍基单晶高温合金因其优异的力学性能、良好的组织稳定性以及抗腐蚀能力,被广泛应用于航空发动机的核心部件^[1]。由于在服役过程中这些部位大多需要承受高温、高应力和腐蚀环境的共同作用,因此对作为叶片材料的镍基单晶高温合金的组织及缺陷控制提出了更高的要求。DD416作为第一代镍基单晶高温合金,主要应用于航空发动机和工业燃气轮机的向心叶轮、涡轮盘、燃烧室、机匣、导向叶片等热端部件^[2]。与单晶叶片由于消除了晶界,其服役性能相较于等轴晶叶片或定向叶片得到了显著提升^[3]。而在单晶叶片中,由于Ta、W等难熔元素含量较高,导致镍基单晶高温合金中容易出现疏松、杂晶等铸造缺陷^[4],严重影响铸件的力学性能,降低叶片的服役寿命,同时也会影响工业生产过程中的交付时间与制造成本。因此在单晶叶片的制备过程中,需要控制这些缺陷的形成和数量^[5-6]。

目前,控制镍基单晶高温合金叶片的疏松含量主要通过改变浇注温度、模壳温度以及抽拉速率等工艺参数^[7],但有关微量元素对镍基单晶高温合金叶片疏松缺陷的影响研究较少。微量元素影响高温合金疏松缺陷的研究主要集中在等轴晶高温合金方面。Chen等^[8]在研究C对RR2086的影响中发现,微量元素C的增加使合金中MC碳化物数量增加,在凝固末期碳化物通过补偿凝固收缩,使疏松含量降低。介子奇^[9]研究发现,通过向K4169合金中添加适量微量元素B和Zr,能显著提高合金流动性,降低内部疏松缺陷。鲜晓^[10]在对K465合金的研究中发现,添加一定量的Zr可减少显微疏松,而过量Zr的添加反而促进疏松和 γ/γ' 共晶形成。周煜焯^[11]向K492M合金中添加一定量的微量元素Mg,发现疏松尺寸和数量均有明显下降。杨飞^[12]在研究B对K325合金的影响时发现,微量元素B的添加能够使二次枝晶间距减小,起到细化枝晶间距的作用。张欣雷^[13]研究了B对DD90合金枝晶和共晶组织的影响,发现随着合金中B含量的增加,二次枝晶逐渐变粗大,而共晶组织数量明显减少。其中,Zr作为典型的晶界强化元素,被认为在等轴晶高温合金铸件中发挥着重要作用。Zhu等^[14]在研究Zr对IN738合金的影响中发现,当Zr含量增时,合金的凝固区间增大,同时二次枝晶间距也明显减小,推测是Zr的添加使得固液界面的界面能降低,抑制了枝晶生长。Li等^[15]在K4169中添加Zr元素发现,Zr添加使颗粒状析出相与基体间的晶格畸变增加,导致析出相周围的显微疏松含量增加。赵广迪^[16]研究了Zr对一种高Al+Ti镍基高温合金组织的影响,发现Zr的

添加显著促进了 $(\gamma+\gamma')$ 共晶在枝晶间的析出,并且Zr含量的增加增大了扩散通量差,促进了合金中显微孔洞的形成。赵洋^[17]研究了Zr对IN939合金流动性及缩松的影响,发现Zr能提高IN939合金的比热和剩余液相分数,降低合金熔体黏度和表面张力,使枝晶间有更多剩余液体进行补缩,进而减小合金的缩松含量。

本文以第一代镍基单晶高温合金DD416为研究对象,分析了微量元素Zr含量的改变对DD416单晶叶片疏松缺陷、微观组织及凝固特性的影响。研究成果对优化DD416高温合金成分,减少单晶叶片疏松缺陷具有重要的理论和指导意义。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

采用第一代镍基单晶高温合金DD416,在合金成分范围内改变微量元素Zr含量,实验中4种合金材料的Zr元素含量为0.001%、0.003%、0.007%及0.012%(质量分数),将其分别命名为10Zr、30Zr、70Zr和120Zr合金。合金成分如表1所示。

表1 DD416高温合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of the DD416 superalloy
(mass fraction/%)

Cr	Co	Mo	Al	Ti	Ta	Hf	C	Zr	Ni
								0.001	
								0.003	
10.0	5.0	3.0	5.0	5.0	2.0	0.1	0.007		Bal.
								0.007	
								0.012	

1.2 模拟方法

使用ProCAST模拟软件对4种不同Zr含量的DD416合金进行叶片浇注模拟,将叶片模型导入前处理Mesh中,对模壳和铸件进行网格划分,为提高模拟实验效率,在模拟过程中将组模等分为6份,选取1/6进行模拟。在设置网格时,对叶片模型不同部位进行网格划分,如图1所示。为保证叶片精度,将网格大小设置为1mm,而对于叶片模型中的冒口、浇道及其他部位,将其大小划分为10mm。随后在Cast模块中设置重力浇注方向,4种实验合金除材料参数不同外,其余工艺参数均保持一致。设置模壳温度为1520℃,浇注温度为1530℃,模壳与金属液界面的换热系数为1000W/(m²·K),叶片抽拉速率为6mm/min。

1.3 实验方法

得到模拟结果后,在定向凝固炉中对4种实验合金进行叶片浇注,炉内真空度保持在5×10⁻¹Pa以下,浇注温度1530℃,模壳温度为1520℃,抽拉速

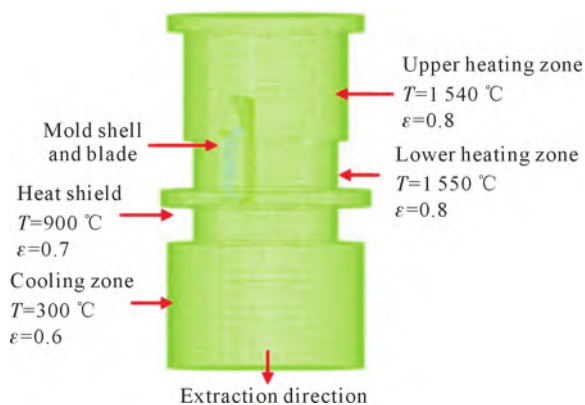


图1 定向凝固系统有限元网格划分

Fig.1 Finite element meshing of the directional solidification system

率固定为 6 mm/min。为保证在浇注过程中合金液流动速度一致,控制浇注速度为 1 kg/s,实验中每次所用 DD416 合金质量为 3 kg,合金材料和叶片模壳由中国航发集团北京航空材料研究院提供。

利用光学显微镜(OM)观察疏松聚集区的疏松缺陷与枝晶形貌,利用扫描电子显微镜(SEM)观察合金 γ/γ' 共晶组织,利用能量色散谱仪(EDS)对合金共晶组织处元素分布进行观察,利用 Image-Pro 软件分别对合金中疏松缺陷和 γ/γ' 共晶面积分数及尺寸大小进行统计。随机选取 5 个不同位置对 γ/γ' 共晶面积分数与尺寸大小进行统计后取平均值。

2 实验结果及讨论

2.1 Zr 含量对 DD416 单晶叶片疏松含量的影响

图 2 为 4 种实验用单晶叶片的疏松缺陷模拟结果。由图 2 可以看出,单晶叶片的疏松主要集中在叶片缘板的边缘处。对模拟的 4 种不同合金浇注的叶片疏松含量进行统计,其结果如表 2 所示。从

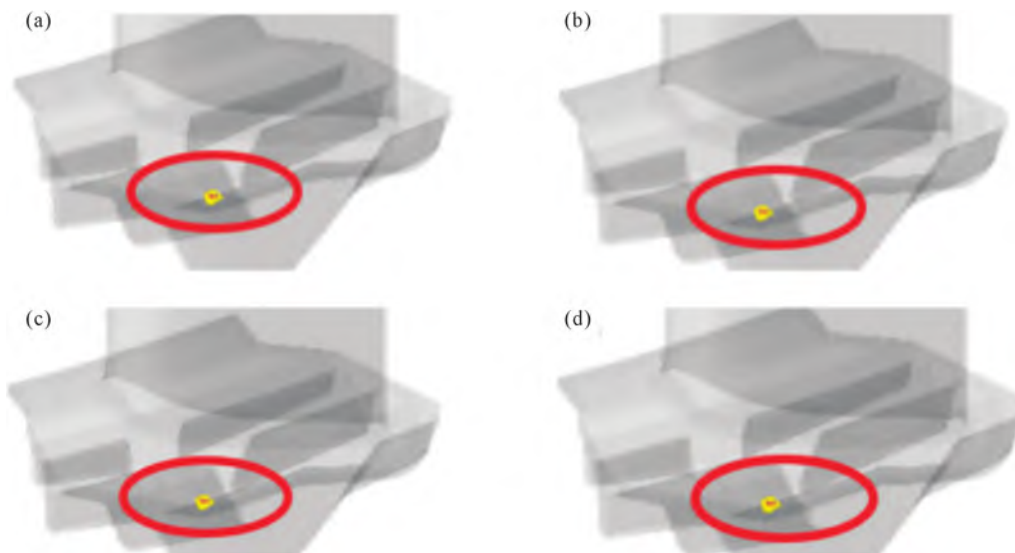


图 2 不同 Zr 含量 DD416 单晶叶片疏松缺陷模拟结果:(a) 10Zr;(b) 30Zr;(c) 70Zr;(d) 120Zr

Fig.2 Simulation results of micro porosity in DD416 single-crystal blades with different Zr contents: (a) 10Zr; (b) 30Zr; (c) 70Zr; (d) 120Zr

表中数据可以看出,随着 Zr 含量增加,单晶叶片的疏松含量呈先降低后升高的趋势。疏松含量由 10Zr 合金的 0.89% 下降到 30Zr 的 0.81% 和 70Zr 的 0.82%,但随着 Zr 含量的进一步增加,其疏松含量增加,120Zr 合金的疏松含量升高至 0.94%。

表2 不同Zr含量下模拟单晶叶片的疏松缺陷体积百分比
Tab.2 Simulation results of microporosity defect volume fraction in DD416 single crystal blades with different Zr contents

Alloy	10Zr	30Zr	70Zr	120Zr
Microporosity percentage/%	0.97	0.81	0.82	0.94

为验证模拟结果的准确性,进一步探究 Zr 对疏松含量的影响,对 4 种 Zr 含量的 DD416 合金进行叶片浇注实验,根据 ProCAST 单晶叶片缺陷的模拟结果,在叶片缘板处取样分析(图 3),利用光学显微镜观察疏松缺陷(图 4)。可以看出,不同 Zr 含量的单晶叶片缘板处疏松数量与尺寸有一定差别,10Zr 和 120Zr 的叶片缘板处有明显的大尺寸疏松缺陷和疏松团聚现象,30Zr 和 70Zr 的大尺寸疏松缺陷和疏松团聚基本消失,且疏松多以小尺寸颗粒状分布。为得到更加准确的疏松含量,利用 Image-Pro 对 4 种叶片缘板处的疏松面积进行统计,结果如表 3 所示。当 Zr 含量较低时,随着 Zr 含量的增加,叶片缘板处的疏松含量由 10Zr 的 0.463% 下降为 30Zr 的 0.184% 和 70Zr 的 0.064%,在 Zr 含量为 0.007%(质量分数,下同)时疏松含量最低。但随着 Zr 含量的进一步增加,疏松含量增加,120Zr 时疏松含量为 0.493%。由此可见,DD416 单晶叶片的疏松含量与 Zr 含量的关系呈现先减小后增加的趋势,这与 ProCAST 的模拟趋势基本一致,表明添加适量 Zr 元素确实能够改善 DD416 单晶叶片的显微疏松。



图3 叶片缘板及取样位置
Fig.3 Blade edge plate and sampling location

2.2 Zr含量对DD416单晶叶片显微组织的影响

为进一步探究Zr含量对疏松含量的作用机理,在叶片缘板处进行取样腐蚀,观察其显微组织。4种

表3 不同Zr含量叶片缘板处的疏松
Tab.3 Porosity at edge plates of blades with different Zr contents

Alloy	10Zr	30Zr	70Zr	120Zr
Microporosity percentage/%	0.463	0.184	0.064	0.493

不同Zr含量的DD416单晶叶片缘板处显微组织如图5所示。由图可知,单晶叶片缘板处呈现出典型的凝固枝晶组织,枝晶间存在较多的 γ/γ' 共晶组织。同时,随着Zr含量的增加,合金的一次枝晶间距和共晶含量有着较为明显的变化。为准确统计Zr含量对显微组织的影响,利用MATLAB和Image-Pro分别统计4种合金的一次枝晶间距与共晶组织含量,结果如

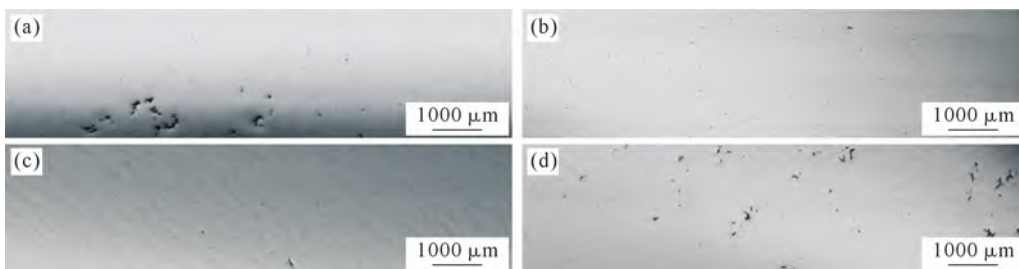


图4 不同Zr含量叶片缘板处疏松缺陷:(a) 10Zr; (b) 30Zr; (c) 70Zr; (d) 120Zr
Fig.4 Microporosity defects at edge plates of blades with different Zr contents: (a) 10Zr; (b) 30Zr; (c) 70Zr; (d) 120Zr

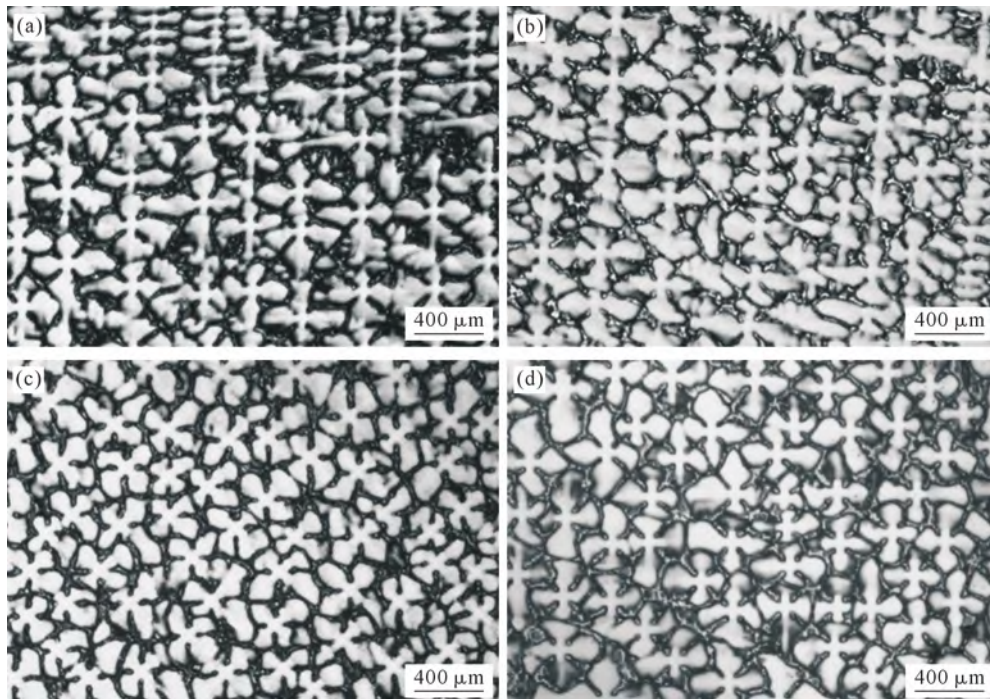


图5 不同Zr含量单晶叶片显微组织:(a) 10Zr; (b) 30Zr; (c) 70Zr; (d) 120Zr
Fig.5 Microstructure of single crystal blades with different Zr contents: (a) 10Zr; (b) 30Zr; (c) 70Zr; (d) 120Zr

表4所示。从表中数据可以看出,随着Zr含量的增加,一次枝晶间距由10Zr合金的355.7 μm 减小至30Zr合金的321.6 μm 和70Zr合金的282.7 μm ,一次枝晶间距分别降低了9.58%和20.52%。而随着Zr含量进一步增加到0.012%时,一次枝晶间距反而增加至370.3 μm 。因此,随着Zr含量的增加,一次枝

表4 不同Zr含量合金的一次枝晶间距与共晶体积分数
Tab.4 Primary dendrite spacing and eutectic volume fraction with different Zr contents

Alloy	10Zr	30Zr	70Zr	120Zr
Primary dendrite spacing/ μm	355.7	321.6	282.7	370.3
Eutectics volume fraction/%	0.133	0.174	0.196	0.207

晶间距先减小后增大,在 Zr 含量为 0.007% 时取得最小值。表 4 中的数据同时说明枝晶间的共晶体积分数则随着 Zr 含量的增加而增大,从 0.001% 的 0.133% 持续增加至 0.012% 的 0.207%。枝晶间距的变化与实验得到的疏松缺陷变化趋势相同,因此推断疏松含量变化是由于一次枝晶间距与共晶组织共同变化而引起的。利用 SEM 进一步观察共晶组织形貌结构,如图 6 所示。 γ/γ' 共晶组织呈现出典型的放射状花样,并分布于枝晶间,随着 Zr 含量的增加,共晶组织的尺寸发生明显变化,数量和面积也显著增加。

γ/γ' 共晶组织体积分数的增加是 Al、Ti 严重偏析的结果,这说明 Zr 的增加有促进 Al、Ti 在枝晶间区域偏析富集的作用。为探究元素在合金枝晶间的具体分布,利用 EDS 对 120Zr 合金共晶组织区域的元素分布进行了扫描,结果如图 7 所示。能够看出 Zr 倾向于聚集在共晶组织处,且分布在共晶与基体交界处。为进一步探究富 Zr 区域的具体成分,使用 EDS 对富 Zr 相上的取样点进行了元素检测,结果如表 5 所示,富 Zr 相处 Ti、Zr、Mo 元素有明显富集,其中 Ti 作为典型的 MC 碳化物形成元素,可以证明 Zr 元素富集在共晶组织处的 MC 碳化物中。同时由于在高温下,MC 碳化物发生退化产生了 $M_{23}C_6$ 碳化物,因此形成了 Mo 元素的富集。传统观点认为 Zr 作为晶界强化元素,会优先偏聚到晶界,增加晶界稳定性,提高合金的高温性能^[18-19]。但周阳等^[20]研究 Zr 在 K417 合金中的分布时发现,Zr 元素在合金

中的溶解度有限,凝固过程中易发生偏析,分布于最后凝固的共晶区域周围,导致 Zr 元素更倾向于停留在共晶和基体之间的界面边界上,因此传统观点认为 Zr 在晶界处富集是不充分的。Zr 富集不是因为晶界的存在,而是由晶界处共晶组织的存在造成,这与实验得到的现象相同。

表 5 120Zr 合金共晶处富 Zr 相元素含量
Tab.5 Elemental content of the Zr-rich phase at the eutectic sites of the 120Zr alloy

(mass fraction/%)					
Element	Ni	Ti	Mo	Cr	Zr
Content%	31.58	15.06	15.70	10.63	27.03

上述实验研究表明,当 Zr 含量由 0.001% 增加到 0.007% 时,DD416 单晶叶片疏松含量降低。由图 4、表 4 和图 7 的结果可知,Zr 含量的变化对 DD416 合金的凝固组织和凝固过程产生了一定影响,尤其是一次枝晶间距。根据 Hunt 模型,当晶体以树枝状形式长大时,其一次枝晶间距满足:

$$\lambda_1 = 2\sqrt{2} \{D_L \Gamma [m(k-1)C_0]\}^{1/4} G^{-1/2} V^{-1/4} \quad (1)$$

式中, λ_1 为一次枝晶间距; D_L 为溶质在液相中的扩散系数; Γ 为吉布斯-汤姆逊系数; m 为液相线的斜率; k 为溶质的平衡分配系数; C_0 为合金初始溶质浓度; G 为凝固前沿的温度梯度; V 为凝固速率。由于 4 种合金采用的浇注条件相同,可以认为 4 种叶片的冷却速度 V 也相同。因此,对于这 4 种不同 Zr 含量的叶片,在凝固中只有 D_L 发生变化。而随着 Zr 含量的增加,由于 Zr 的原子半径远大于 Ni 基体,在液相中迁移时需克服较高的晶格畸变能。扩散激活能

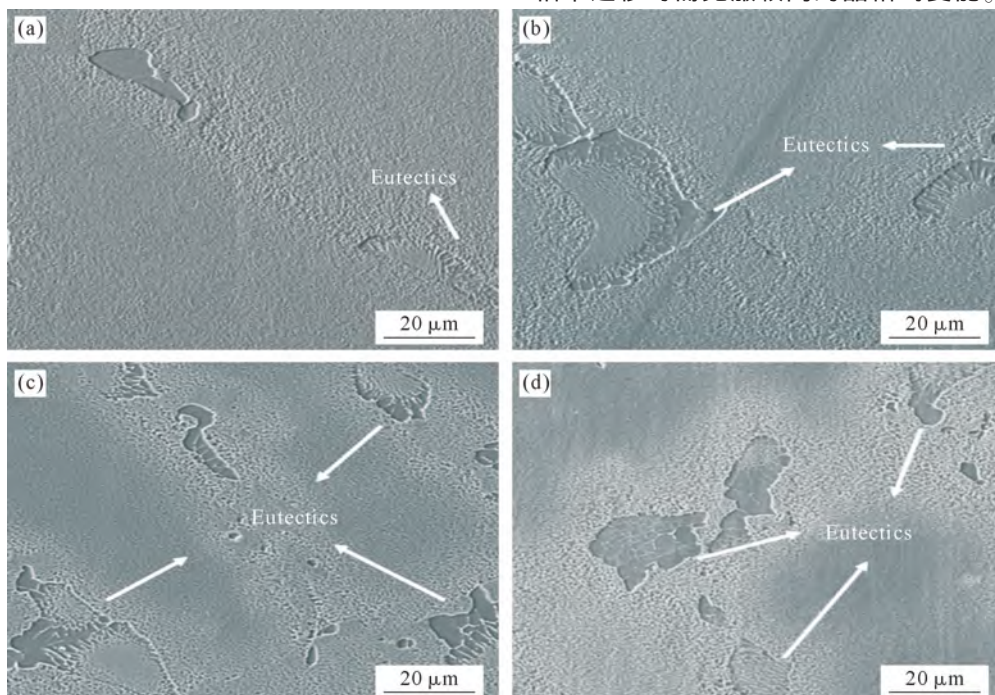


图 6 不同 Zr 含量单晶叶片 γ/γ' 共晶组织:(a) 10Zr; (b) 30Zr; (c) 70Zr; (d) 120Zr
Fig.6 γ/γ' eutectic of single crystal blades with different Zr contents: (a) 10Zr; (b) 30Zr; (c) 70Zr; (d) 120Zr

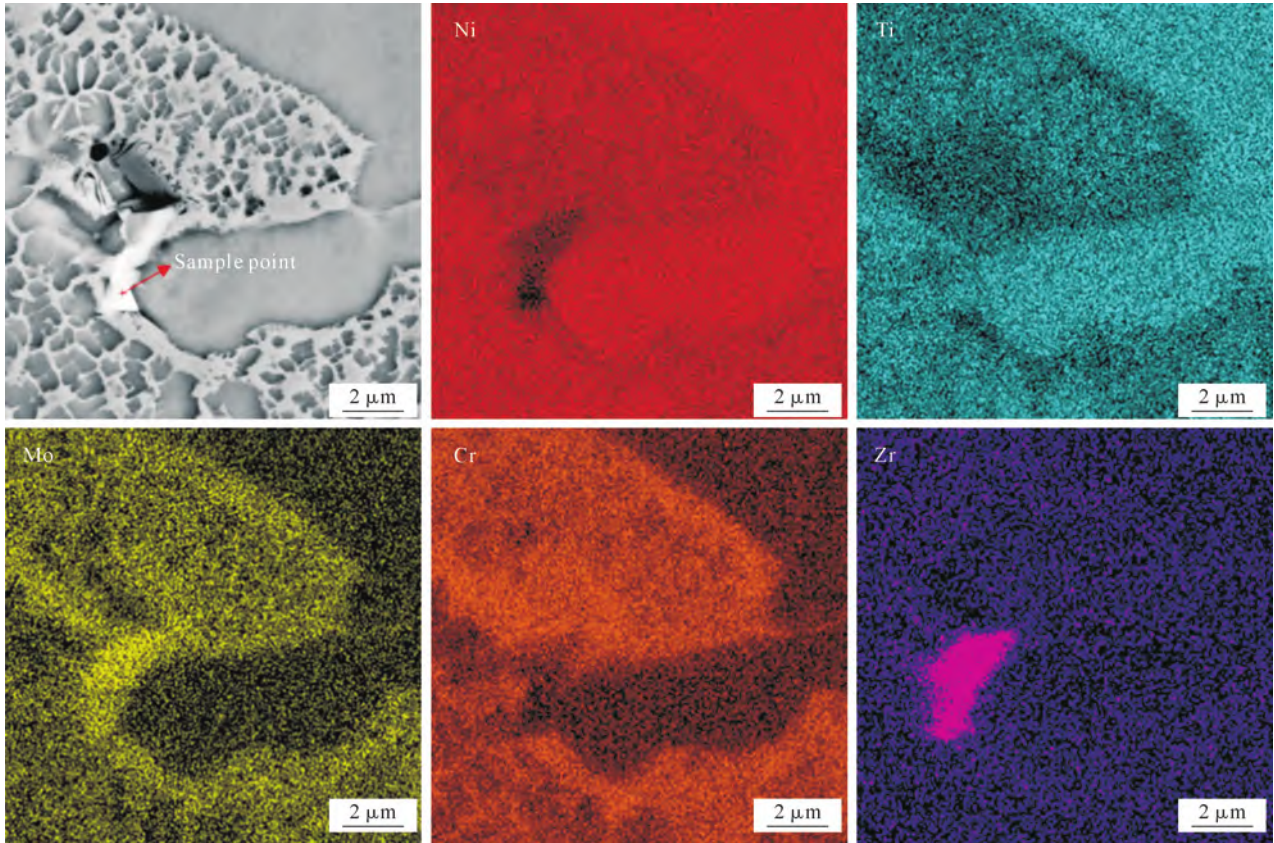


图7 120Zr合金共晶处的元素分布

Fig.7 Elemental distribution at the eutectic sites of the 120Zr alloy

与扩散速率满足 Arrhenius 方程:

$$D_L = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (2)$$

式中, D_0 为频率因子; Q 为扩散激活能。随着 Zr 含量增加, 原子间相互作用增强, 即扩散激活能增大, 使其扩散系数 D_L 减小, 结合式(1), λ_1 减小。

高温合金铸件的疏松缺陷主要是因为合金液在凝固过程中, 固-液界面的枝晶过于发达, 枝晶之间相互交叉形成熔池, 后续熔池由于无法得到合金液的补缩而形成疏松缺陷^[21]。当 Zr 含量由 0.001% 增加到 0.007%, 一次枝晶间距是影响疏松缺陷的主要因素。枝晶间距的减小会使熔池的数量及体积减小, 避免了形成大尺寸疏松及团聚, 进而使疏松含量降低。杨叶等^[22]在研究 CM247LC 合金组织和缺陷时也认为枝晶臂间距的增大, 会使枝晶间的熔池尺寸相对增大, 其凝固的组织也越来越不均匀, 最终导致缩孔尺寸增大。因此适量 Zr 元素的添加能够细化枝晶, 减小疏松含量。

为进一步探究 Zr 对疏松缺陷的影响机理, 利用 JMatPro 对 4 种不同 Zr 含量的合金进行了热力学计算, 结果如图 8 所示。从图中可以看出, 随着 Zr 含量增加, 合金液相线基本保持不变, 固相线有所降低, 合金的液相线从 1342.18 °C 降低到 1342.02 °C。而固相线温度有明显下降, 从 10Zr 的 1210 °C 下降

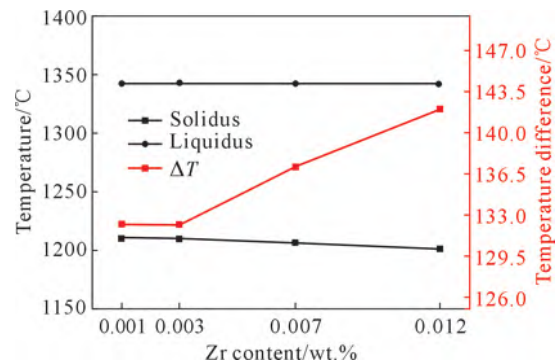


图8 Zr含量对DD416合金固液相线及凝固区间的影响

Fig.8 Effects of Zr content on the liquidus and solidus line diagrams and solidification interval of DD416 alloys

到 120Zr 的 1200 °C, 降低了 10 °C。凝固温度区间由 10Zr 的 132.18 °C 增加到 120Zr 的 142.02 °C, 凝固温度区间有所增大, 导致糊状区的大小发生变化, 从而影响铸件凝固过程中凝固缺陷的形成。

当 Zr 含量由 0.007% 增加到 0.012% 时, 疏松含量显著增加。这可能与 Zr 含量变化引起 DD416 合金凝固行为和共晶组织的变化有关。由图 8 可知, 随 Zr 含量增加, DD416 合金液相线基本保持不变, 而固相线温度有所降低, 即合金凝固过程中初熔点降低, 初生晶数量增加, 凝固时间延长。同时, 较大原子半径 Zr 的增加会使得枝晶间的 γ/γ' 共晶组织含量上升。周鹏杰等^[23]提出达到共晶点时剩余液相体积

与溶质的有效分配系数 k_E 有关,如式(3)所示:

$$f_L = (k_E - 1) \left(\frac{C_E}{C_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中, f_L 为达到共晶成分时液相的体积分数,即共晶体积分数; C_E 为共晶成分。随着 Zr 含量的增加, D_L 减小, k_E 增大,进而共晶体积增大。共晶组织尺寸和数量的增加,使得一次枝晶间距增加,金属液的流动阻力增大,共晶组织含量和凝固区间成为疏松缺陷的主要影响因素。同时,周阳等^[24]提出共晶的增加本身就会导致合金液流动困难,合金在最后凝固阶段补缩不足。因此随着 Zr 含量的增加,疏松缺陷尺寸增大、数量增多。另一方面,高温合金的疏松缺陷主要是由于凝固过程中合金液流过糊状区时压降增大,导致后续液相不能对位置进行补偿。Lecomte-Beckers^[25]通过热力学计算提出了疏松缺陷形成倾向指数糊状区压降 ΔP^* ,通过下式计算获得:

$$\Delta P^* = \frac{24\mu\beta'n\tau^3}{\rho_L g} \left(\frac{\Delta T}{G} \right)^2 \left(\frac{df_s}{dt} \right) \quad (4)$$

式中, μ 为合金黏度; β' 为凝固收缩率; n 为单位面积内树枝晶数量; τ 为二次枝晶发达程度; ρ_L 为液相密度; g 为重力加速度; ΔT 和 G 分别为凝固温度区间和温度梯度; df_s/dt 为合金凝固速率。 ΔP^* 数值越小,疏松形成倾向就越小。由于 Zr 的添加,凝固区间 ΔT 增大,即 ΔP^* 数值越大,疏松形成的倾向就越大。因此,随着 Zr 含量的进一步增加,合金的凝固区间 ΔT 增加,疏松含量增加。

3 结论

(1)借助 ProCAST 仿真模拟,发现 DD416 单晶叶片的疏松缺陷主要集中在叶片缘板处的边缘。并且随着 Zr 含量的增加,疏松缺陷含量先降低后升高,当 Zr 含量为 0.003% 和 0.007% 时获得较低值。

(2)DD416 合金中适量添加 Zr,使得浇注过程中溶质的扩散激活能增大,扩散系数降低,叶片的一次枝晶间距减小,枝晶间的熔池尺寸及数量也相对降低。此时一次枝晶间距为疏松缺陷的主要影响因素,叶片缘板处的疏松含量,从 10Zr 的 0.463% 降低到 70Zr 的 0.064%,疏松含量降低了 0.399%。

(3)随着 Zr 含量进一步增加到 0.012%, DD416 合金的凝固区间进一步增大,且 Zr 倾向于偏聚在 γ/γ' 共晶与基体界面处,形成 MC 碳化物。同时 γ/γ' 共晶组织含量及面积增加,阻碍了合金液的流动,此时共晶含量和凝固区间成为疏松缺陷的主要影响因素。共晶含量的增加和凝固区间的增大导致合金在最后凝固阶段补缩不足,从而使得 Zr 含量进一步增加后

叶片的疏松含量增加,120Zr 时疏松含量增加到了 0.493%。

参考文献:

- [1] 曹凯莉,杨文超,屈鹏飞,黄太文,郭敏,苏海军,张军,刘林. Ru 对镍基单晶高温合金凝固特性、TCP 析出及蠕变性能影响的研究进展[J]. 材料工程, 2022, 50(1): 80-92.
CAO K L, YANG W C, QU P F, HANG T W, GUO M, SU H J, ZHANG J, LIU L. Research progress in effect of Ru on solidification characteristics, precipitation of topologically close-packed phases and creep property of nickel-based single crystal superalloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(1): 80-92.
- [2] ZHENG S, ZHANG J, WU Q H, YANG Z Y, LUO Y S. Influence of composition adjustment on the microstructure and properties of a first generation Ni-base single crystal superalloy DD416 [A]. High performance structural materials: Proceedings of chinese materials conference 2017 18th [C]. Singapore: Springer Singapore, 2018: 653-660.
- [3] 卜昆,邱飞,王志红,田国良,张现东. 镍基单晶叶片制造技术及再结晶研究进展[J]. 航空制造技术, 2016(21): 34-40.
PU K, QIU F, WANG Z H, TIAN G L, ZHANG X D. Development of manufacture technology and recrystallization study for nickel based single crystal hollow turbine blade [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(21): 34-40.
- [4] 李林骏. 镍基单晶高温合金塑性变形与断裂行为研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
LI L J. Study on plastic deformation and fracture behavior of nickel-based single crystal superalloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [5] 熊艳才. 航空复杂构件精确成形技术基础研究[J]. 航空制造技术, 2010(2): 54-57.
XIONG Y C. Basic research of precision forming technology of aviation complex components [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(2): 54-57.
- [6] 何树先,王俊. 大型复杂薄壁高温合金铸件熔模精铸技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2013, 42(21): 5-8, 12.
HE S X, WANG J. Development on investment casting of large thin wall complex superalloy castings [J]. Hot Working Technology, 2013, 42(21): 5-8, 12.
- [7] 朱鸥. 航空发动机用单晶叶片铸造缺陷解读[J]. 铸造技术, 2017, 38(5): 986-989.
ZHU O. Interpretation of casting defects in single-crystal blades for aeroengines [J]. Foundry Technology, 2017, 38(5): 986-989.
- [8] CHEN Q Z, KONG Y H, JONES C N. Porosity reduction by minor additions in RR2086 superalloy [J]. Scripta Materialia, 2004, 51(2): 155-160.
- [9] 介子奇. 微量元素及熔体处理对 K4169 高温合金组织和性能的影响[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
JIE Z Q. Influence of trace element and melt treatment on microstructure and property of K4169 superalloy [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.
- [10] 鲜晓,王博,李华兵,靳西奎,江明辉,董鸿志. 钨添加量对 K465 高温合金显微组织和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2025, 49(6):

- 98-104.
- XIAN X, WANG B, LI H B, JIN X K, JIANG M H, DONG H Z. Effects of Zr addition amount on microstructure and properties of K465 superalloy[J]. *Materials and Mechanical Engineering*, 2025, 49(6): 98-104.
- [11] 周煜焯,杨文超,张丽辉,谢君,张彦超,邢伟杰,付文磊,樊晓光. Mg元素对K492M高温合金流动性及疏松缺陷的影响[J]. *铸造技术*, 2025, 46(4): 354-361.
- ZHOU Y H, YANG W C, ZHANG L H, XIE J, ZHANG Y C, XING W J, FU W L, FAN X G. Effects of Mg on the fluidity and microporosity defects of K492M superalloy[J]. *Foundry Technology*, 2025, 46(4): 354-361.
- [12] 杨飞. B、Al和Ti对K325合金组织和性能的影响[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- YANG F. Effect of B, Al and Ti on microstructure and properties of K325 alloy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [13] 张欣雷. 微量元素B对镍基单晶高温合金凝固组织的影响[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2014, 42(4): 55-58.
- ZHANG X L. Effect of trace element boron on the solidification microstructure of single-crystal nickel-based superalloy[J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2014, 42(4): 55-58.
- [14] ZHU H Q, TANG Y J, LI Y G, ZHU X Y, HU Z Q, SHI C X. Effect of boron and zirconium on directional solidification behaviour and segregation of DS IN738 superalloy[J]. *Materials at High Temperatures*, 1992, 10(1): 39-44.
- [15] LI Y M, LIU H J, LIU J. Effect of Zr addition on precipitates in K4169 superalloy[J]. *China Foundry*, 2012, 9(1): 6-10.
- [16] ZHAO G D, GAO S. Effect of Zr on microstructure evolution of a high Al+Ti containing Ni-based superalloy during homogenization[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(9): 3372-3380.
- [17] 赵洋. 钽含量对IN939高温合金凝固行为与性能的影响[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
- ZHAO Y. Influence of Zr content on the solidification behavior and property of IN939 superalloy[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022.
- [18] HEYDARI D, BAKHSHI A. Hot tearing in polycrystalline Ni-based IN738LC superalloy: Influence of Zr content[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(3): 681-687.
- [19] FLOREEN S. The effects of B and Zr on the creep and fatigue crack growth behavior of a Ni-base superalloy[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1983, 14(4): 895-901.
- [20] 周阳,李文韬,王博,史志武,李淑苹,梁加森,周菲,王俊,孙宝德. 微量元素Zr在K417/K417G铸造镍基高温合金中的分布状态与作用机理研究[J]. *航空制造技术*, 2024, 67(23/24): 46-57.
- ZHOU Y, LI W T, WANG B, SHI Z W, LI S P, LIANG J M, ZHOU F, WANG J, SUN B D. Investigations on segregations and functioning mechanisms of minor element Zr in K417/K417G cast nickel-based superalloys[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2024, 67(23/24): 46-57.
- [21] 安阁英. 铸件形成理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- AN G Y. Theory of casting forming[M]. Beijing: China Machine Press, 1990.
- [22] 杨叶,徐维台,赵国平. 镍基高温合金CM247LC定向凝固组织的演化研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44(8): 1119-1126.
- YANG Y, XU W T, ZHAO G P. Microstructure evolution of directionally solidified Ni-based CM247LC superalloy[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2024, 44(8): 1119-1126.
- [23] 周鹏杰,何向明. 微量元素对镍基高温合金共晶数量的影响[J]. *铸造*, 2012, 61(8): 868-872.
- ZHOU P J, HE X M. Influences of minor alloying elements on the eutectic volume of Ni-Base superalloy[J]. *Foundry*, 2012, 61(8): 868-872.
- [24] 周阳,崔艳娜,王博,李淑苹,李明,王俊. 微量元素Zr对高温合金铸件凝固缺陷及持久性能的影响[J]. *有色金属材料与工程*, 2024, 45(5): 10-17.
- ZHOU Y, CUI Y N, WANG B, LI S P, LI M, WANG J. Influences of minor alloying element Zr on the casting defects and stress-rupture properties in nickel-based superalloy castings[J]. *Nonferrous Metal Materials and Engineering*, 2024, 45(5): 10-17.
- [25] LECOMTE-BECKERS J. Study of microporosity formation in nickel-base superalloys[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1988, 19: 2341-2348.

(责任编辑:李亚敏)